

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-103945

(43)公開日 平成9年(1997)4月22日

(51)Int.Cl. ⁶	識別記号	序内整理番号	F I	技術表示箇所
B 24 B	9/00		B 24 B	9/00
	17/10			17/10
B 25 J	9/06		B 25 J	9/06
	9/10			9/10
				A
				A
				A

審査請求 有 請求項の数 5 FD (全 17 頁)

(21)出願番号 特願平7-286384

(22)出願日 平成7年(1995)10月9日

(71)出願人 000107996

セイコー精機株式会社

千葉県習志野市屋敷4丁目3番1号

(72)発明者 島田 明

千葉県習志野市屋敷4丁目3番1号 セイ
コー精機株式会社内

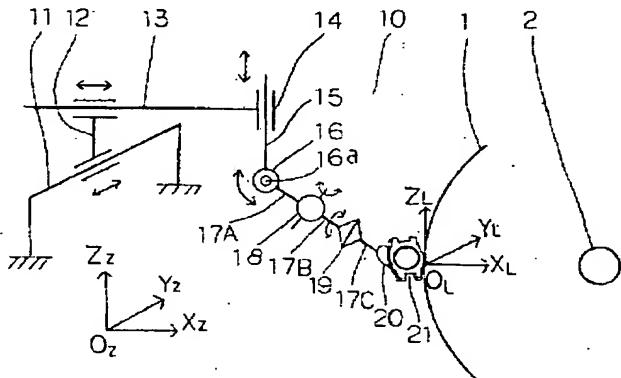
(74)代理人 弁理士 植名 正利

(54)【発明の名称】 時計外装ケース研磨装置及び汎用研磨装置

(57)【要約】

【課題】 ワークの制御均衡を取りやすく、制御演算をより単純にかつ安価な時計外装ケース研磨装置及び汎用研磨装置を提供する。

【解決手段】 ワーク21と研磨ホィール1が接触を開始する位置に初期座標系Lを、接触した状態で接触面座標系Cを、またワーク21の中央にワーク座標系Wを各自設定する。力制御及びモーメント制御則に基づき、初期座標系Lに対する接触面座標系Cの同時変換行列^LA_cを逐次更新していく制御と、ワーク座標系Wに対する接触面座標系Cの位置及び姿勢を逐次更新する制御とを機能分離させた形で同時変換行列を作成し、位置、姿勢、力及びモーメントを同時に演算制御させる。また、力及びモーメント検出値は、各駆動部の駆動力と位置とからオブザーバにより推定する。更に、第1直動関節1、第2直動関節13及び第3直動関節15は初期座標系Lに直交させる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 座標原点を基準として回転関節の中心に存するアーム基点の空間位置座標を定める空間位置座標移動手段と、前記アーム基点から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端は時計外装ケースを把持する把持手段と、前記時計外装ケースの一端面を圧接することで時計外装ケースの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した研磨ホイールを備えて構成したことを特徴とする時計外装ケース研磨装置。

【請求項2】 座標原点に一端を固定し他端の第1関節を直線駆動する第1直動関節手段と、前記第1関節に一端を支持され他端の第2関節を直線駆動する第2直動関節手段と、前記第2関節に一端を支持され他端のアーム基点を中心に有する回転関節を直線駆動するアーム基点直動手段と、前記アーム基点から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端はワークを把持する把持手段と、前記ワークの一端面を圧接することでワークの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した研磨ホイールを備え、前記第1直動関節手段による直線駆動方向、前記第2直動関節手段による直線駆動方向及び前記アーム基点直動手段による直線駆動方向は各々前記座標原点を基準としたX軸、Y軸及びZ軸のいずれかに平行し、かつ前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系と前記座標原点を基準としたX軸、Y軸及びZ軸とが対応する軸同士平行することを特徴とする汎用研磨装置。

【請求項3】 座標原点に対し、複数の研磨ホイールが放射状に配置される汎用研磨装置であって、前記座標原点の属する平面に対する垂線を中心として周方向に旋回自在である旋回手段と、該旋回手段の頂部に固設された第1関節と、該第1関節に一端を支持され他端の第2関節を前記垂線と直角な方向に直線駆動する第2直動関節手段と、前記第2関節に一端を支持され他端の第1回転関節を前記垂線と平行な方向に直線駆動する第3直動関節手段と、前記第3直動関節手段から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端はワークを把持する把持手段と、前記ワークの一端面を圧接することでワークの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した複数の研磨ホイールを備え、前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系と、前記第2直動関節手段による直線駆動方向及び前記第3直動関節手段による直線駆動方向とが平行することを特徴とする汎用研磨装置。

【請求項4】 研磨ホイール若しくは該研磨ホイールに

10

20

30

40

圧接することにより研磨されるワークの位置及び姿勢と前記研磨ホイールと前記ワーク間に加える力及びモーメントを同時に制御し、かつ座標原点を基台としたマニピュレータにより前記研磨ホイール若しくは前記ワークを把持させ研磨作業を行う汎用研磨装置であって、各研磨工程毎に予め設定した前記研磨ホイールと前記ワーク間に加える力及びモーメントの指令設定値と前記研磨ホイールと前記ワーク間の押圧された接触面に働く力及びモーメントの反作用値を検出した力及びモーメント検出値との偏差に基づき、前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系に対する前記接触面の属する接触座標系の位置及び姿勢を逐次更新する力制御則手段と、前記研磨ホイール若しくは前記ワークの位置及び姿勢を変えることで前記研磨ホイール若しくは前記ワークに属する座標系に対する前記接触座標系の位置及び姿勢を逐次更新する位置姿勢制御手段と、該位置姿勢制御手段と前記力制御則手段の演算結果及び前記座標原点の属するベース座標系に対する前記初期座標系の位置及び姿勢に基づき前記マニピュレータの手先位置及び姿勢を演算するマニピュレータ手先演算手段と、該マニピュレータ手先演算手段の演算結果に基づき前記マニピュレータを構成する直動関節若しくは回転関節の各駆動部をそれぞれ駆動する関節駆動手段を備えて構成したことを特徴とする汎用研磨装置。

【請求項5】 前記力及びモーメント検出値は、前記関節駆動手段による各駆動部の駆動力と、該駆動力が与えられた結果生ずる変位とからオブザーバにより推定することを特徴とする請求項4記載の汎用研磨装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、時計外装ケースの研磨工程をマニピュレータを用いて自動化する時計外装ケース研磨装置と、研磨ホイールとワーク間の位置及び姿勢と力及びモーメントを機能分離した形で、しかも同時に演算制御する時計外装ケース研磨装置及び汎用研磨装置に係わり、特にマニピュレータの制御の均衡を早くとることで安定した制御が行え、位置等の計算が容易にかつ安価な時計外装ケース研磨装置及び汎用研磨装置に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、時計外装ケースの研磨工程は熟練者が手作業で行っており未だ自動化されていない。研磨工程は大別して粗研磨、中研磨及び仕上げ研磨に分けられる。図15に従来行われてきた時計外装ケースの粗研磨装置の構成を示す。図15において、研磨ホイール1は回転軸2が所定の空間位置に軸支されている。研磨ホイール1に僅かの隙間を隔てて、時計外装ケース3を載置するためのプレート4が設けられている。そして、プレート4は、プレート4の設置位置及び姿勢(角度)を変えるためのネジ5a、5bを両端に有するプレートア

ーム6を介して固定台7に支持されている。

【0003】かかる構成の下で、作業者は以下の様に研磨作業を行う。作業者は、まずプレート4上に時計外装ケース3を載置する。そして、時計外装ケース3の下面とプレート4の上面を合わせた状態で、時計外装ケース3を研磨ホイール1方向にスライドさせ、研磨ホイール1に接触させる。接触後もプレート4との下面接触を保ちながら、研磨ホイール1との接触箇所を順次変えていき研磨作業を行う。この際、時計外装ケース3の研磨は、時計外装ケース3の各曲面を3次元的に研磨する必要がある。このため、作業者は研磨面に適するようにプレート4の取り付け角度をその都度調節している。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】ところで、従来の作業者による研磨作業は熟練者がその作業を行っているためコストが高かった。また、近年は時計産業においても多種少量生産化が進んでおり、固定シーケンスの自動研磨機を開発したとしてもフレキシブルな対応が出来ないおそれがあった。ここに、上記した諸問題を解決するために時計外装ケースの研磨分野でも、自動化のためのマニピュレータを導入する必要性が望まれていた。しかし、従来から他分野で研磨作業に用いられてきたマニピュレータの多くは研磨ホイールを把持して行うもので、そのまま時計外装ケースの分野に導入することは適當ではない。時計外装ケースの研磨に利用するには、研磨ホイールが大きく重いため力学的、制御的に動かし難い等といった問題がある。このため、時計外装ケースを把持して制御を行うマニピュレータの開発がエネルギー節約の点からも望まれていた。

【0005】また、ワークを把持するマニピュレータの場合の例でも、従来行われてきた制御には以下の様な問題があった。図16において、図示しないマニピュレータはワーク21を把持している。そして、例えば(a)の様にX方向に1[N]で研磨ホイール1にワーク21を押しつけながら、(b)の様にY方向下方にワーク21を移動させて研磨する。(c)は研磨面に変化の生じる場合でも上記した制御をそのまま続ける場合を示し、

(d)は研磨面に変化の生じる場合に、ワーク21の姿勢を変えてその後上記した制御を続ける場合を示す。上記制御は、力と位置とを同時に制御するという観点からハイブリッド制御と呼ばれているが、X方向に力制御方向とY方向に位置制御方向という様に制御を完全に分けている。このため、X方向の移動は力情報によってのみ決定されることになり、ワーク21の研磨面に変化の生じる場合には力検出値のX成分が一旦減り、マニピュレータはその結果を補正しようとして行き過ぎ等の振動を生じ易い。

【0006】更に、上記ハイブリッド制御は複雑な行列計算を伴うため、行列計算に適した例えば外力推定計算のし易い機構構成を工夫する必要がある。また、一台の

10

20

30

40

50

マニピュレータを兼用して、複数の研磨ホイール1を常用、予備あるいは研磨の度合いを変化させて使う等の必要性がある。更に、マニピュレータの各関節部には反力を検出するために、例えば手首部分に力センサが設けられたりトルクセンサ等が設置されることが多いが、マニピュレータの全費用のうち、かかるトルクセンサに要する費用の比率が高いという問題点も存在する。本発明はこのような従来の課題に鑑みてなされたもので、時計外装ケースの研磨工程をマニピュレータを用いた時計外装ケース研磨装置を開発することで自動化する。そして、ワークの位置及び姿勢と、研磨ホイールへの押しつけ力及びモーメントを機能分離させた形でしかも同時に演算制御させることで、制御の均衡を取りやすく、安価でかつフレキシビリティの高い時計外装ケース研磨装置及び汎用研磨装置を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】このため本発明（請求項1）は、座標原点を基準として回転関節の中心に存するアーム基点の空間位置座標を定める空間位置座標移動手段と、前記アーム基点から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端は時計外装ケースを把持する把持手段と、前記時計外装ケースの一端面を圧接することで時計外装ケースの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した研磨ホイールを備えて構成した。

【0008】また、本発明（請求項2）は、座標原点に一端を固定し他端の第1関節を直線駆動する第1直動関節手段と、前記第1関節に一端を支持され他端の第2関節を直線駆動する第2直動関節手段と、前記第2関節に一端を支持され他端のアーム基点を中心にもつ回転関節を直線駆動するアーム基点直動手段と、前記アーム基点から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端はワークを把持する把持手段と、前記ワークの一端面を圧接することでワークの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した研磨ホイールを備え、前記第1直動関節手段による直線駆動方向、前記第2直動関節手段による直線駆動方向及び前記アーム基点直動手段による直線駆動方向は各々前記座標原点を基準としたX軸、Y軸及びZ軸のいずれかに平行し、かつ前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系と前記座標原点を基準としたX軸、Y軸及びZ軸とが対応する軸同士平行するよう構成した。

【0009】更に、本発明（請求項3）は、座標原点に対し、複数の研磨ホイールが放射状に配置される汎用研磨装置であって、前記座標原点の属する平面に対する垂線を中心として周方向に旋回自在である旋回手段と、該旋回手段の頂部に固設された第1関節と、該第1関節に

一端を支持され他端の第2関節を前記垂線と直角な方向に直線駆動する第2直動関節手段と、前記第2関節に一端を支持され他端の第1回転関節を前記垂線と平行な方向に直線駆動する第3直動関節手段と、前記第3直動関節手段から回転関節とリンクの組み合わせを少なくとも一対以上連結したアーム手段と、該アーム手段の先端に一端を固定し他端はワークを把持する把持手段と、前記ワークの一端面を圧接することでワークの表面を研磨し、かつ回転動力伝達のための中心軸を所定の空間座標位置に軸支した複数の研磨ホイールを備え、前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系と、前記第2直動関節手段による直線駆動方向及び前記第3直動関節手段による直線駆動方向とが平行するよう構成した。

【0010】更に、本発明（請求項4）は、研磨ホイール若しくは該研磨ホイールに圧接することにより研磨されるワークの位置及び姿勢と前記研磨ホイールと前記ワーク間に加える力及びモーメントを同時に制御し、かつ座標原点を基台としたマニピュレータにより前記研磨ホイール若しくは前記ワークを把持させ研磨作業を行う汎用研磨装置であって、各研磨工程毎に予め設定した前記研磨ホイールと前記ワーク間に加える力及びモーメントの指令設定値と前記研磨ホイールと前記ワーク間の押圧された接触面に働く力及びモーメントの反作用値を検出した力及びモーメント検出値との偏差に基づき、前記研磨ホイールと前記ワークが押圧することなく最初に接した状態に設定される初期座標系に対する前記接触面の属する接触座標系の位置及び姿勢を逐次更新する力制御則手段と、前記研磨ホイール若しくは前記ワークの位置及び姿勢を変えることで前記研磨ホイール若しくは前記ワークに属する座標系に対する前記接触座標系の位置及び姿勢を逐次更新する位置姿勢制御手段と、該位置姿勢制御手段と前記力制御則手段の演算結果及び前記座標原点の属するベース座標系に対する前記初期座標系の位置及び姿勢に基づき前記マニピュレータの手先位置及び姿勢を演算するマニピュレータ手先演算手段と、該マニピュレータ手先演算手段の演算結果に基づき前記マニピュレータを構成する直動関節若しくは回転関節の各駆動部をそれぞれ駆動する関節駆動手段を備えて構成した。

【0011】更に、本発明（請求項5）は、前記力及びモーメント検出値は、前記関節駆動手段による各駆動部の駆動力と、該駆動力が与えられた結果生ずる変位からオブザーバにより推定するよう構成した。

【0012】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。本発明の第1実施形態を示す図1において、第1直動関節11は第1関節12を座標原点O_zからY_z方向に直線駆動するもので第1直動関節手段に相当する。第2直動関節13は第1関節12に一端を支持され、他端の第2関節14をX_z方向に直線駆動す

10

20

30

40

50

るもので第2直動関節手段に相当する。第3直動関節15は第2関節14に一端を支持され、他端の第1回転関節16をZ_z方向に直線駆動するものでアーム基点直動手段に相当する。第1回転関節16の中心はアーム基点16aに相当する。第1直動関節11、第2直動関節13及び第3直動関節15の組み合わせは、空間位置座標移動手段に相当する。第1回転関節16のアーム基点16aには、第1リンク17Aの一端が固定され、第1リンク17Aの他端には第2回転関節18を介し第2リンク17Bの一端が固定されている。そして、第2リンク17Bの他端には、第3回転関節19を介し第3リンク17Cの一端が固定されている。第1回転関節16、第1リンク17A、第2回転関節18、第2リンク17B、第3回転関節19及び第3リンク17Cの組み合わせはアーム手段に相当する。第3リンク17Cの他端はマニピュレータ10の手先に相当し、ワーク21を把持する把持手段としての手首機構20が固定されている。第1回転関節16、第2回転関節18及び第3回転関節19はそれぞれ矢印の様に回転可能である。そして、ワーク21に対峙して、回転軸2が所定の空間位置に軸支された研磨ホイール1が設けられている。マニピュレータ10は、上述した様に6関節を有すれば人と同様の動作をすることが可能となるため、6関節を有することが理想である。しかし、必ずしも6関節を有しなくても適宜関節及びリンクを省略して構成することは可能である。

【0013】第1直動関節11、第2直動関節13及び第3直動関節15は、例えばシリング及びピストンにより構成するが、電動、油圧、空気圧等で駆動可能である。X_z、Y_z及びZ_zは、直交座標軸であるが各軸は任意の方向に設定可能である。空間位置座標移動手段は後述するような計算の便を考慮すれば、第1直動関節11、第2直動関節13及び第3直動関節15は、X_z、Y_z及びZ_zの対応する軸同士平行させる必要がある。しかし、計算の便を考慮しなければ回転関節で構成しても良いし、直動関節の本数も上述した様に各座標軸対応の3本に限定することもない。直交座標軸に必ずしも平行させることもない。また、回転関節と直動関節の組み合わせにて構成しても良い。

【0014】次に、マニピュレータ10の制御について説明する。マニピュレータ10は、例えば図2に示す様なワーク21の形状例に対し研磨動作を行う。研磨動作M=(M₁, M₂, …, M_i, …, M_N)はワーク21の研磨面の数Nに対してN種類だけ定義される。各研磨動作M_iの研磨フローを図3に示す。マニピュレータ10は、研磨動作M₁、M₂、…等の様にワーク21の研磨を行う。各研磨動作M_iにおいて、マニピュレータ10はワーク21の研磨面への接近及び接触をまず行う。ここに、一連の研磨を連続して行う単研磨動作の様な場合にはM₁で接近及び接触を行っておき、その後

の研磨動作は離脱することなく連続して行う。そして、各研磨面への接触は押しつけ力を伴いながら、研磨面を適宜移動若しくはワーク21を回転させることで研磨動作を行う。一連の研磨動作を終了後は、マニピュレータ10はワーク21の研磨面からの離脱動作を行う。

【0015】ところで、マニピュレータ10は空間に所定の位置と姿勢を定めるが、一般に3次元空間の任意の位置と姿勢を実現するためには、位置の3自由度と姿勢の3自由度の計6自由度が必要である。そこで、かかる位置と姿勢を定義するために、任意の2つの座標系を選択し、一方の座標系から見た他方の座標系を図4の様に 4×4 行列（以下、同時変換行列という。）で表す。図4で、 ${}^c A_D$ はC座標系に対するD座標系の位置と姿勢を同時変換行列で示したものである。 P_x, P_y, P_z は、C座標系の原点から見たD座標系の原点の位置ベクトルPの値、即ち、C座標系に対するD座標系の位置を示す。 $n_x, n_y, n_z, o_x, o_y, o_z$ 及び a_x, a_y, a_z は、D座標系の原点をC座標系の原点に移動したと仮定した場合のD座標系の各軸の大きさ1の座標成分を示す。ここに、 n_x, n_y, n_z 等はC座標系に対するD座標系の姿勢を示す。一方、図4で ${}^D A_C$ は、D座標系に対するC座標系の位置と姿勢を同時変換行列で示したものである。

【0016】かかる同時変換行列を利用して、ワーク21を把持するマニピュレータ10と研磨ホイール1全体について位置と姿勢を表現すると、位置と姿勢の計算が行列計算に置き換えることが出来計算上便利である。

今、座標原点 O_z を含む座標系をベース座標系Zと定義する。また、前述した各研磨動作 M_i に対して研磨開始姿勢が設定されるが、ワーク21の研磨面と研磨ホイール1が接触を開始する位置及び姿勢において、ホイール1側に固定した座標系を初期座標系Lと定義する。図5にベース座標系Z及び初期座標系Lの様子を示す。初期座標系Lは、ワーク21の研磨対象面毎に研磨開始姿勢に対応してベース座標系Zに対して設定される。ベース座標系Zに対する初期座標系Lは、同時変換行列を使い ${}^z A_L$ と表される。

【0017】次に、例えばバフレースを使用した研磨ホイール1とワーク21間に、ワーク21側に固定した接触面座標系Cを定義する。作業開始時にワーク21が研

10

20

30

40

磨ホイール1に接触している時、ワーク21が研磨ホイール1に力を及ぼさない限り、初期座標系Lと接触面座標系Cは一致するものとする。この時の状態を図6

(A)に示す。ワーク21が、研磨ホイール1にある力とモーメントを与えると研磨ホイール1は弾性変形する。XL方向にへこむと仮定した場合のワーク21の接触面座標系Cは、もともとの初期座標系Lとずれを生じる。この時の状態を図6(B)に示す。この位置及び姿勢のずれは両者の間に生じている力とモーメントの関数として考えられる。ここに、ワーク21を介し研磨ホイール1との接触面に与える力とモーメント情報に基づき、ワーク21の接触面座標系Cを初期座標系Lに対し次々と更新する制御が可能である。即ち、力及びモーメントの指令設定値と研磨ホイール1とワーク21間の押圧された接触面に働く力及びモーメントの反作用値を検出した力及びモーメント検出値との偏差値に基づき、接触面座標系Cを次々と更新することで力制御を実現する。ここで、力及びモーメントの指令設定値は、

【数1】

$$F_r = [F_{xr}, F_{yr}, F_{zr}, M_{xr}, M_{yr}, M_{zr}]^T$$

力及びモーメント検出値は、

【数2】

$$F = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$$

とする。両者の差を力及びモーメント誤差ベクトル E_F とする。

【0018】

【数3】

$$E_r = F_r - F$$

$$= [E_{rx}, E_{ry}, E_{rz}, E_{mx}, E_{my}, E_{mz}]^T$$

一方、 E_F によって修正される位置及び姿勢誤差ベクトル d_X を以下の様に定める。

【数4】

$$d_X = [d_{rx}, d_{ry}, d_{rz}, d_{mx}, d_{my}, d_{mz}]^T$$

両者を結び付けるための方策を以下に示す。力制御に関して、

【数5】

$$[d_{rx}, d_{ry}, d_{rz}]^T = \text{diag} [K_x, K_y, K_z] [E_{rx}, E_{ry}, E_{rz}]^T$$

一方、モーメント制御に関しては、姿勢誤差 E_θ として、

【数7】

但し、

【数6】

$$K_x = K_{px} + K_{ix} \cdot \int dt + K_{ax} \cdot d/dt$$

$$K_y = K_{py} + K_{iy} \cdot \int dt + K_{ay} \cdot d/dt$$

$$K_z = K_{pz} + K_{iz} \cdot \int dt + K_{az} \cdot d/dt$$

$$\mathbf{E}_\phi = [d_{mx}, d_{my}, d_{mz}]^T = [r_x, r_y, r_z]^T \cdot \sin \phi$$

但し、 r は等価回転軸ベクトル、 ϕ ($0 \leq \phi \leq \pi/2$) は等価回転角とする。

【0019】図7に等価回転軸及び等価回転角の様子を示す。数7で等価回転軸及び等価回転角を導入するのは、ロール、ピッチ、ヨー角やオイラー角と姿勢誤差を結び付けた場合に回転順序を考慮する必要があるためである。モーメント検出値には軸毎の検出順序は含まれていないのでそれらの姿勢表現に制御則を直接に結び付け*10

$$\mathbf{E}_\phi = \text{diag} [K_{mx}, K_{my}, K_{mz}] [E_{mx}, E_{my}, E_{mz}]^T$$

但し、

【数9】

$$K_{mx} = K_{mrx} + K_{mry} \cdot \int dt + K_{mrz} \cdot d/dt$$

$$K_{my} = K_{myx} + K_{myy} \cdot \int dt + K_{myz} \cdot d/dt$$

$$K_{mz} = K_{mzx} + K_{mzy} \cdot \int dt + K_{mzz} \cdot d/dt$$

とする。各ゲインは数11が成り立つ様に設定される。以上の例はPID制御系でだが、必要に応じて他のアリゴリズムを使用することも考える (J. C. Doyle

"State-Space Solution to H2 and H ∞ Control Problems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 8, pp. 831-847, 1989, S. Bo

$$r_x = dM_x / |dM|, r_y = dM_y / |dM|, r_z = dM_z / |dM|$$

$$\sin \phi = |dM| \quad \phi = \sin^{-1} |dM| \quad (0 \leq \phi \leq \pi/2)$$

以上より、

$${}^t A_C =$$

$$\begin{bmatrix} -r_x \cdot r_x \cdot V\phi + C\phi & r_x \cdot r_y \cdot V\phi - r_z \cdot S\phi & r_x \cdot r_z \cdot V\phi + r_y \cdot S\phi & d_{rx} \\ r_x \cdot r_y \cdot V\phi + r_z \cdot S\phi & r_y \cdot r_y \cdot V\phi + C\phi & r_y \cdot r_z \cdot V\phi - r_x \cdot S\phi & d_{ry} \\ r_x \cdot r_z \cdot V\phi - r_y \cdot S\phi & r_y \cdot r_z \cdot V\phi + r_x \cdot S\phi & r_z \cdot r_z \cdot V\phi + C\phi & d_{rz} \end{bmatrix} \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

数12は力補償器を内に含む同時変換行列である。前記した力制御及びモーメント制御則に基づき、初期座標系Lに対する接触面座標系Cの同時変換行列 ${}^t A_C$ を逐次更新していく制御は力制御手段に相当する。

【0022】次に、ワーク21の形状及びワーク21上の接点(面)は既知とし、かつ接点(面)を研磨ホイール1の接点に事前に移動させ教示できると仮定すると、研磨を開始する姿勢と初期座標系Lが設定できる。前述した様に各々の初期座標系Lに対して力制御をするための接点座標系Cが設定されるが、一方で接点座標系Cに対するワーク座標系Wを ${}^t A_w$ で定義する。ワーク座標系Wは、例えばワーク21の中央に仮想

的に設定する。ここに、ワーク座標系Wを変更することで結果的に接点の位置及び姿勢を変更する制御が可能となる。ワーク座標系Wと接点座標系Cとの関係を図8(A)に示す。接点座標系Cに対するワーク座標系Wの回転若しくは並進により接点の移動若しくは回転を生じ、接点座標系Cはこのことから移動若しくは回転する。研磨開始姿勢は図8(B)に示す様に予めマニピュレータ10に教示する。この時、初期座標系Lと接点座標系Cは等しい。研磨開始姿勢は同時変換行列として計算式に取り込まれる。

【0023】次に、マニピュレータ10の手先に属する座標系をマニピュレータ手先座標系Rとして定義する。

ワーク座標系Wに対するマニピュレータ手先座標系Rの同時変換行列 ${}^w A_R$ は、例えば数13の様に常に定数となる。但し、数値は機構により異なる。

【数13】

$${}^w A_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -60 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 79 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

研磨作業 M_i は、回転若しくは並進を行うことで実施される。回転は、指定軸回りにワーク座標系Wを微小回転させ、改めてワーク座標系Wとする。また、並進は、指定軸に沿ってワーク座標系Wを微小並進させ、改めてワーク座標系Wとする。こうした作業を各研磨作業 M_i 毎に実施する。

【0024】図9は、ワーク21を時計外装ケース3として、側面研磨を想定した具体的な姿勢制御例を示す。即ち、時計外装ケース3を縦にして接触させた状態から側曲面を研磨する。マニピュレータ10は時計外装ケース3を把持した状態で研磨ホイール1に接近し

(M_{1a})、時計外装ケース3を研磨ホイール1と接触させる(M_{1c})。この時ワーク座標系Wと接触面座標系Cとの距離は円状ケースの場合ケース半径rである。そして、先ず時計外装ケースの右上方側面を研磨するため接触させたまま Z_w 軸回りに+18度回転させる

(M_{1b1})。その後10mm Y_w 軸方向に移動させ(M_{1b2})、10mm戻す(M_{1b3})。そして、今度は右下方側面を研磨するため接触させたまま Z_w 軸回りに-36度回転させる(M_{1b4})。右上方側面と同様に10mm Y_w 軸マイナス方向に移動させ(M_{1b5})、10mm戻す(M_{1b6})。その後、接触させたまま Z_w 軸回りに+18度回転させ元の接触開始時点の状態に戻し(M_{1b7})、離脱させる(M_{1d})。かかる接觸状態での同時変換行列(M_{1hj} ($j=1 \sim 7$))は数14の様に表される。表1に以上の研磨工程の設定条件を示す。

【0025】

【数14】

$${}^e A_{1hj} (j=1 \sim 7) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & -r \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$y_{10} \geq y_1 \geq -y_{10}$$

【表1】

j	r (mm)	α (deg)	y ₁ (mm)
1	12	0 to 18	0
2	12	18	0 to 10
3	12	18	10 to 0
4	12	18 to -18	0
5	12	-18	0 to -10
6	12	-18	-10 to 0
7	12	-18 to 0	0

上記したワーク座標系Wに対する接觸面座標系Cの位置及び姿勢を逐次更新する制御が、位置姿勢制御手段に相当する。この様に、力制御及びモーメント制御則に基づき、初期座標系Lに対する接觸面座標系Cの同時変換行列 ${}^L A_C$ を逐次更新していく制御と、ワーク座標系Wに対する接觸面座標系Cの位置及び姿勢を逐次更新する制御とを機能分離させた形で同時変換行列を作成するため、位置、姿勢、力及びモーメントを同時に演算制御することが出来、しかも整理された形での制御が可能となる。これにより、従来存在したマニピュレータの行き過ぎ等による振動を生じ難く、早期に制御の均衡を取ることが出来る。また、従来の様に力を常に一方向から与えるのではなく、各研磨動作の接觸面に応じた力及びモーメントのバランスの取れた制御が可能となる。

【0026】マニピュレータ10につき、以上のようにして算出した各同時変換行列に基づき、数15の様な座標変換方程式を構成することが可能である。

【数15】

$${}^z A_R = {}^z A_L {}^L A_C {}^C A_W {}^W A_R$$

図10には理解を容易にするため、各同時変換行列間の関連をベクトル図で示す。ここで、ベース座標系Zに対する初期座標系Lの同時変換行列 ${}^z A_L$ と、ワーク座標系Wに対するマニピュレータ手先座標系Rの同時変換行列 ${}^W A_R$ は、機構により定まり定数である。従って、力制御及びモーメント制御則に基づき逐次更新される、初期座標系Lに対する接觸面座標系Cの同時変換行列 ${}^L A_C$ と、接觸面座標系Cに対するワーク座標系Wの位置及び姿勢を逐次更新する同時変換行列 ${}^C A_W$ を計算すれば、ベース座標系Zに対するマニピュレータ手先座標系

Rの同時変換行列 ${}^z A_R$ を求めることが出来、結局マニピュレータ10の手先の位置及び姿勢が求められる。かかるマニピュレータ10の手先の位置及び姿勢を求める演算は、マニピュレータ手先演算手段に相当する。

【0027】今までの説明に基づき、任意の姿勢での力とモーメントを制御する本制御のブロック図を図11に示す。図11のブロック図に基づき以下説明する。接触面座標系Cで表した力及びモーメントの指令設定値 ${}^c F_r$ と、接触面座標系Cで表した力及びモーメント検出値 ${}^c F$ との差をとり力及びモーメント誤差ベクトル ${}^c E_F$ を求める。その後力及びモーメント誤差ベクトル ${}^c E_F$ に基づき、力補償器Cfにより初期座標系Lから接触面座標系Cへの変位である位置及び姿勢誤差ベクトル ${}^l d X$ を算出する。Aでは、等価回転軸及び等価回転角で表した位置及び姿勢データを同時変換行列型に変換する。表1に示したr、 α 、y1作業パラメータに基づき、Ωで接触面座標系Cからワーク座標系Wへの同時変換行列 ${}^c A_w$ を算出する。そして、Φで力補償器Cfの出力結果と作業パラメータに対応したベース座標系Zに対するマニピュレータ手先座標系Rの同時変換行列 ${}^z A_R$ を求める。次に、Tで同時変換行列 ${}^z A_R$ から位置及びロールピッヂヨー角への変換を行う。ここに X_{Fr} は、マニピュレータ10の移動する目標の参照値である。 ${}^z X_{Pr}$ は、力制御を行わない場合にマニピュレータ10を移動させる位置目標である。 T^{-1} は、逆運動学方程式であり直角座標系で表された変数を角度座標系に変換する。Γは、この角度座標系への変換を計算機で計算する際の計算遅れを示す。 ${}^J Q_r$ は、各関節軸の移動目標値を示す。ここに、添字Jは関節軸座標系であることを示す。C_{fd}は位置制御フィードフォワード補償器である。 ${}^J E_P$ は、各関節軸の移動目標値 ${}^J Q_r$ と各関節軸の実際の角度 ${}^J Q$ との偏差を示す。位置制御補償器C_Pは各関節軸の駆動トルクを出力するもので、関節駆動手段に相当する。O_{bs}は、外乱・速度オブザーバ及びフィードバック補償器である。各関節軸に与えられる駆動トルクと各関節軸の実際の変位(角度) ${}^J Q$ を入力して、オブザーバ理論により外乱を推定し制御系にフィードバックさせている。O_{bs}は、トルクセンサ等が高価なため代替として用いる。駆動トルクは電流換算して読み込んでいる。オブザーバを計算機で実施する手法については、論文(「外乱トルク・速度推定オブザーバを用いた制御系のデジタル化」電学論D、113巻4号、平成5年)に詳しい。

【0028】制御対象モデルPはm入力1出力伝達関数を示し、出力は各関節軸の実際の角度 ${}^J Q$ である。角度 ${}^J Q$ は、Tで角度座標系で表した変数を直角座標系に変換される。Tは順運動学方程式であり、姿勢の3成分はロールピッヂヨー角で表す。 T^{-1} でロールピッヂヨー角から同時変換行列 ${}^z A_{RC}$ への変換を行う。Nで、マニピュレータ手先座標系Rから接触面座標系Cまでの同時変

換行列を求める。Πでは初期座標系Lに対する接触面座標系Cの実際のずれが生ずる。次に、Tで同時変換行列 ${}^z A_{RC}$ から位置及びロールピッヂヨー角への変換を行う。接触モデルは、接触した時のずれに応じて力を生じ、非線型に表現したのは接触前では力を生じないことを意味する。環境モデル①は、研磨ホイール1がバフレースである等その時の弾性や粘性等の係数等を示す。ここでトルクセンサ等により検出された力が力センサ出力 ${}^s F$ である。この各関節軸上の力センサ出力 ${}^s F$ に、ヤコビの転置行列 (J_{sc}^T) を掛けることで接触面座標系C上の力及びモーメント検出値 ${}^c F$ を得ることが出来る。ここに、(J_{sc}^T) はセンサ座標系Sを定義した場合のセンサ座標系Sから接触面座標系Cへのヤコビ行列の転置を意味する。一方、力センサ出力 ${}^s F$ に、センサ座標系Sから軸座標系Jへのヤコビの転置行列 (J_{sj}^T) を掛けたものが外乱 ${}^J D$ である。

【0029】図12は、高価なトルクセンサ等により力を検出する代わりに、前述したオブザーバを利用した実施形態を示す。オブザーバO_{bs}を利用して推定外乱値を得、これに接触面座標系Cから軸座標系Jへのヤコビ行列の転置逆行列 (J_{cj}^T) $^{-1}$ を掛けることで接触面座標系C上の力及びモーメント検出推定値 ${}^c F$ を得ることが出来る。このオブザーバによる力及びモーメント検出推定値 ${}^c F$ を力制御則に利用することで安価に本制御を行うことが出来る。次に、図13(A)に本発明の第2実施形態を、また図13(B)に本発明の第3実施形態を示す。第3実施形態は第2実施形態を変形したものである。なお、第1実施形態と同一のものには同一の符号を付して説明を省略する。図13(A)において、研磨ホイール1は座標原点O_zに対し複数個放射状に配置されている。旋回軸31は、O_zからZ_z方向に伸びる垂線を中心として図中矢印で示す周方向に旋回自在であり旋回手段に相当する。旋回軸31の頂部には第1関節32が固設されている。第2直動関節33は、第1関節32に一端を支持され他端の第2関節34を垂線O_z Z_zと直角な方向に直線駆動するもので第2直動関節手段に相当する。第3直動関節35は、第2関節34に一端を支持され他端の第1回転関節36を垂線O_z Z_zと平行な方向に直線駆動するもので第3直動関節手段に相当する。第1回転関節36には第1リンク17Aの一端が固定され、第1リンク17Aの他端には第2回転関節37を介し第2リンク17Bの一端が固定されている。

【0030】また、図13(B)において、第1関節42は他端の旋回軸41を垂線O_z Z_z方向に直線駆動する様になっている。旋回軸41は、垂線O_z Z_zを中心として図中矢印で示す周方向に旋回自在に構成されている。旋回軸41には、第2関節44の一端が固定されている。第2関節44は、他端の第1回転関節36を直線駆動する様になっている。しかし、後述する計算の便を考慮しなければかかる構成に限定しなくても良いことは

先述の通りである。マニピュレータ30又は40は、かかる構成の下に放射方向に配置された複数の研磨ホイール1に対し、第1実施形態のマニピュレータ10と同様の制御を指定された順番通りに行う。

【0031】その結果、複数の研磨ホイール1の研磨の度合いを変化させて連続した研磨作業が可能となる。また、研磨ホイール1の駆動回路（図示せず。）が故障若しくは点検等であっても他の研磨ホイール1に変えることが出来る。なお、第1実施形態乃至第3実施形態ともワーク21を把持するとして説明したが、研磨ホイール1を把持し同様の機構を用い、かつ同様のハイブリッド制御をすることも可能である。次に、力及びモーメントの検出に適した機構構成について説明する。図14に示す機構例に対して各座標変換系を定義し、ワーク21にかかる力及びモーメントと各関節軸での等価力を求め。接触面座標系Cでの力及びモーメントは、 $JF = J_{JC^T} \times {}^C F$ より ${}^C F = (J_{JC^T})^{-1} \times {}^J F$ で表される。このヤコビ行列 J_{JC^T} に着目し、機構の特徴を考察する。この時接触面座標系Cは初期座標系Lとごく僅かなずれしかなく、初期座標系Lに近似出来るものとする。

【0032】図14の機構に対するDenavit-Hartenbergのパラメータを表にまとめると表2の様になる。

【表2】

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	-90	y	-90
2	L_1	-90	x	90
3	0	90	$-L_1$	90
4	0	0	0	θ_1
5	0	90	0	θ_2
6	0	-90	L_2	θ_3

表2を基に同時変換行列を作成すると数16の様になる。

【数16】

17

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

18

但し、c, s は各々 \cos と \sin を表すものとする。これより、ベース座標系 Z から各関節までの同時変換行列を作成する。また、ベース座標系 Z から見た接触面座標系 C の同時変換行列は、ベース座標系 Z と接触面座標系 C を同じ姿勢と仮定して作成する。即ち、第 1 直動関節 1 1、第 2 直動関節 1 3 及び第 3 直動関節 1 5 は、お*

*互いに直交させ（各直動関節をベース座標系 Z のどの軸に対応させるかは自由である。）、かつ初期座標系 L の各座標軸と対応する軸同士平行させる。ヤコビの転置行列 J_{JC^T} を求め、 JF を計算した結果を数 1 7 に示す。

【0033】

【数 1 7】

$$\begin{aligned} {}^JF &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^Cf_y \\ {}^Cf_x \\ {}^Cf_z \\ -e_y {}^Cf_x + e_x {}^Cf_y + {}^Cm_z \\ -e_x c\theta_2 {}^Cf_x - e_x s\theta_2 {}^Cf_y + (e_x s\theta_2 + e_x c\theta_2) {}^Cf_z + s\theta_2 {}^Cm_z - c\theta_2 {}^Cm_y \\ a_x {}^Cf_x + a_x {}^Cf_y + a_x {}^Cf_z - c\theta_1 s\theta_2 {}^Cm_x - s\theta_1 s\theta_2 {}^Cm_y + c\theta_1 {}^Cm_z \\ a_x = -s\theta_1 s\theta_2 (z+L_c\theta_2) - c\theta_2 (y-L_c\theta_1 s\theta_2) \\ a_x = c\theta_2 (x-L_c\theta_1 s\theta_2) + c\theta_1 s\theta_2 (z-L_c\theta_1) \\ a_x = -c\theta_1 s\theta_2 (y-L_c\theta_1 s\theta_2) + s\theta_1 s\theta_2 (x-L_c\theta_1) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

但し、 e_x, e_y, e_z は単位ベクトルを表す。その結果、第 1 乃至第 3 軸に発生する力又はトルクが、接触面座標系 C にかかる力成分と 1 対 1 に対応することが分かる。即ち、どの様な姿勢で力制御した場合でも、接触面座標系 C における力成分は第 1 乃至第 3 軸にかかる外力を求めて検出可能であることが分かる。これが第 1 実施形態乃至第 3 実施形態で、ベース座標系 Z と接触面座標系 C を同じ姿勢に構成する場合の優位点である。な

お、第 2 実施形態及び第 3 実施形態の旋回軸 3 1、4 1においてはトルクを検出し、半径方向の距離で割ることで接触面座標系 C に平行した力の方向成分を算出する。

【0034】また、今度は逆にオブザーバにより各関節軸にかかる外力を推定した時、接触面座標系 C にどれくらいの力又はトルクがかかっているかを計算する。その計算結果を数 1 8 に示す。

【数 1 8】

$$\begin{bmatrix} {}^c f_x \\ {}^c f_y \\ {}^c f_z \\ {}^c m_x \\ {}^c m_y \\ {}^c m_z \end{bmatrix} = (J_{\omega c}^{-1})^{-1} {}^J F$$

$$= \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_1 \\ \tau_3 \\ d_1 \tau_1 + d_2 \tau_2 + d_3 \tau_3 + c^2 \theta_2 / b \tau_4 - s \theta_1 s \theta_2 / b \tau_5 - c \theta_2 / b \tau_6 \\ d_4 \tau_1 + d_5 \tau_2 + d_6 \tau_3 + s \theta_2 c \theta_2 / b \tau_4 - c \theta_1 s \theta_2 / b \tau_5 - s \theta_2 / b \tau_6 \\ e_x \tau_1 - e_y \tau_2 + \tau_4 \end{bmatrix}$$

$$d_1 = e_y c^2 \theta_2 / b - e_z c \theta_2 s \theta_1 s \theta_2 / b + a_1 c \theta_2 / b$$

$$d_3 = -e_x s \theta_1 c \theta_2 / b - e_z s \theta_2 c \theta_1 s \theta_2 / b + a_2 s \theta_2 / b$$

$$d_5 = (e_y s \theta_2 + e_x c \theta_2) c \theta_1 s \theta_2 / b + a_3 s \theta_2 / b$$

その結果、関節軸における外力 ${}^J F$ の値をオブザーバにより推定しさえすれば、研磨作業時に接触面座標系 C に働く押し付け力又はモーメントは容易に推定出来ることになり、第 1 実施形態乃至第 3 実施形態の機構構成とオブザーバの推定機構との相性が格段に良くなる。この様に推定した接触面座標系における押し付け力又はモーメントは力制御に容易に用いることが出来る。しかも、力に関しては座標変換が不要であることから本機構の有効性を確認出来る。

【0035】

【発明の効果】以上説明したように本発明（請求項 1）によれば、時計外装ケース研磨装置は時計外装ケースを把持し、研磨ホイールに圧接することで表面を研磨する構成としたので、力学的に見ても制御が行い易く、かつ時計外装ケースの多種少量生産を目的としたマニピュレータによる自動化が可能となった。

【0036】また、本発明（請求項 2）では、各直動関節をベース座標系と平行に配設し、かつベース座標系と初期座標系とを平行させて構成したので、関節に働く外力又はモーメントと接触面座標系における押し付け力又はモーメントは比較的単純なヤコビ行列で結び付けられる。特に力に関しては特定の関節軸における外力と接触面座標系における外力とが 1 対 1 の関係になり外乱計算が容易になる。

【0037】更に、本発明（請求項 3）では、旋回手段により垂線の周方向に旋回自在とし、かつ初期座標系と第 2 直動関節手段による直線駆動方向及び第 3 直動関節

手段による直線駆動方向とを平行させて構成したので、請求項 2 による効果に加え複数の研磨ホイールを対象として連続した研磨作業等が可能となる。

【0038】更に、本発明（請求項 4）では、研磨ホイールとワーク間の位置及び姿勢と力及びモーメントを機能分離した形で、しかも同時に演算制御する構成としたので、マニピュレータの制御の均衡を早くとることが出来安定した制御が行える。

【0039】更に、本発明（請求項 5）では、力及びモーメント検出値は、オブザーバ理論に基づきオブザーバにより推定する構成としたので、トルクセンサ等を使用した場合に比べ安価である。

【0040】

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 実施形態である時計外装ケース研磨装置の構成図

【図 2】 多数の研磨面を有するワークの形状例

【図 3】 多数の研磨面を有するワークの研磨フロー

【図 4】 任意の 2 つの座標間の同時変換行列

【図 5】 ベース座標系及び初期座標系の概念図

【図 6】 初期座標系及び接触面座標系の概念図

【図 7】 等価回転軸及び等価回転角の概念図

【図 8】 ワーク座標系と接触面座標系との関係を示す概念図

【図 9】 時計外装ケースの側面研磨を想定した姿勢制御例

【図 10】 各同時変換行列間の関連を示すベクトル図

【図11】 本発明の第1実施形態である時計外装ケース研磨装置の制御ブロック図

【図12】 オブザーバにより力及びモーメント検出値を推定したときの時計外装ケース研磨装置の制御ブロック図

【図13】 本発明の第2実施形態及び第3実施形態である時計外装ケース研磨装置の構成図

【図14】 力及びモーメントの検出に適した機構構成例

【図15】 従来の時計外装ケースの粗研磨装置の構成図

【図16】 従来のハイブリッド制御の概念図

【符号の説明】

- 1 研磨ホイール
- 2 回転軸
- 3 時計外装ケース
- 4 プレート

10、30、40 マニピュレータ

11 第1直動関節

12、32、42 第1関節

13、33 第2直動関節

14、34、44 第2関節

15、35 第3直動関節

16、36 第1回転関節

16a アーム基点

17A 第1リンク

17B 第2リンク

17C 第3リンク

18、37 第2回転関節

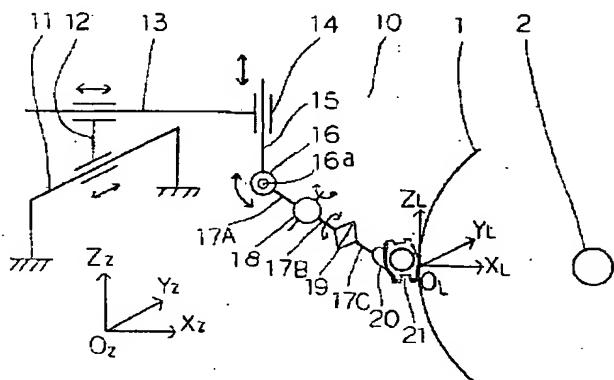
19 第3回転関節

20 手首機構

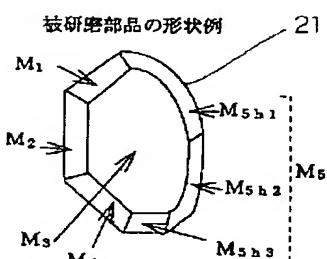
21 ワーク

31、41 旋回軸

【図1】



【図2】



【図4】

$${}^c A_D = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Diagram illustrating coordinate transformations between a base coordinate system (X_b, Y_b, Z_b) and a local coordinate system (X_D, Y_D, Z_D). It shows vectors P, X_D, Y_D, Z_D, and their corresponding components.

$$P = (p_x, p_y, p_z)$$

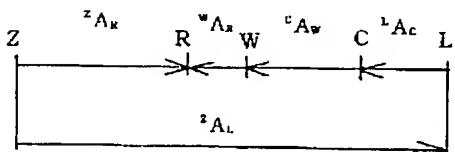
$$X_D = (n_x, n_y, n_z)$$

$$Y_D = (o_x, o_y, o_z)$$

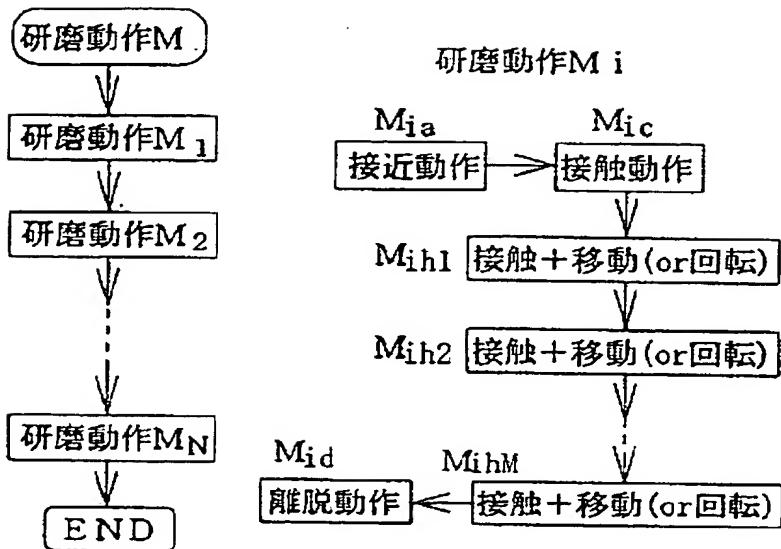
$$Z_D = (a_x, a_y, a_z)$$

$${}^b A_c = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & -n \cdot p_x \\ o_x & o_y & o_z & -o \cdot p_y \\ a_x & a_y & a_z & -a \cdot p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

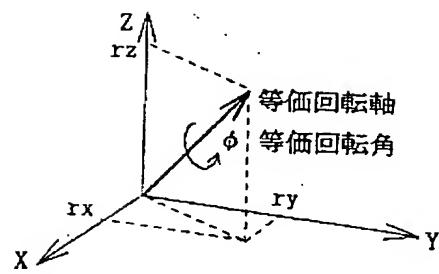
【図10】



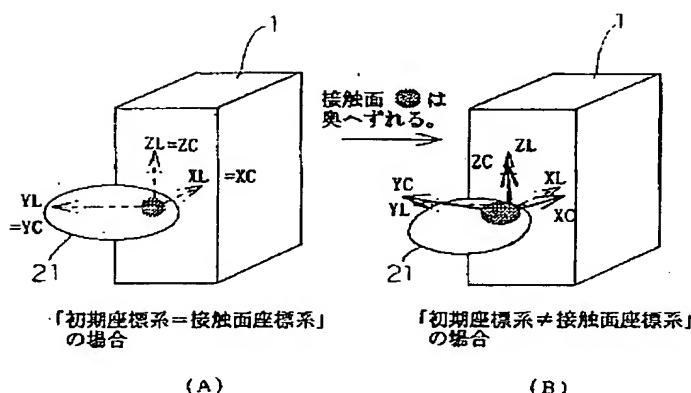
【図3】



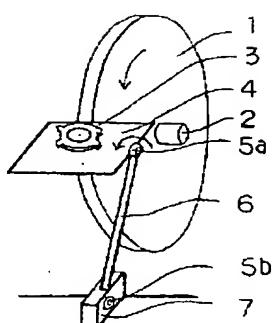
【図7】



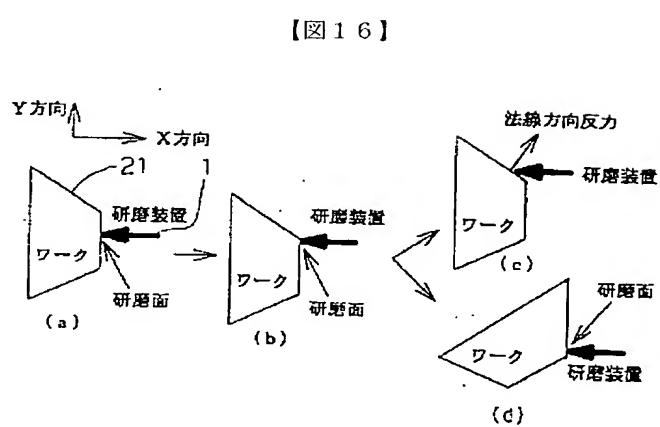
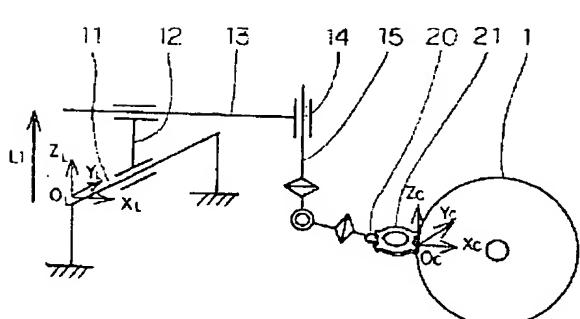
【図6】



【図15】

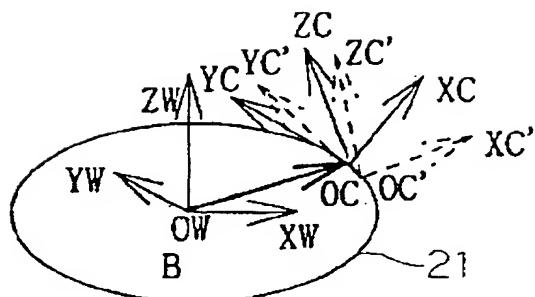


【図14】

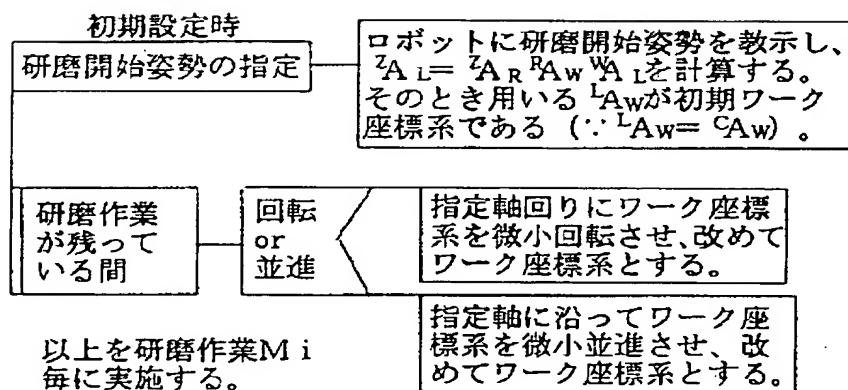


【図16】

【図8】

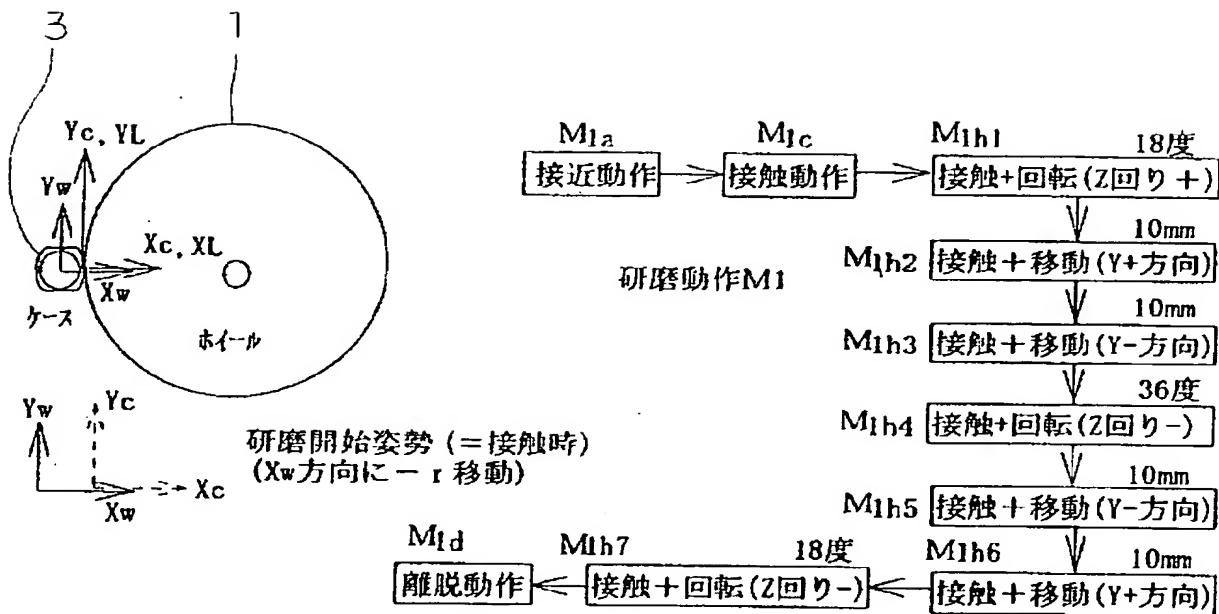


(A)

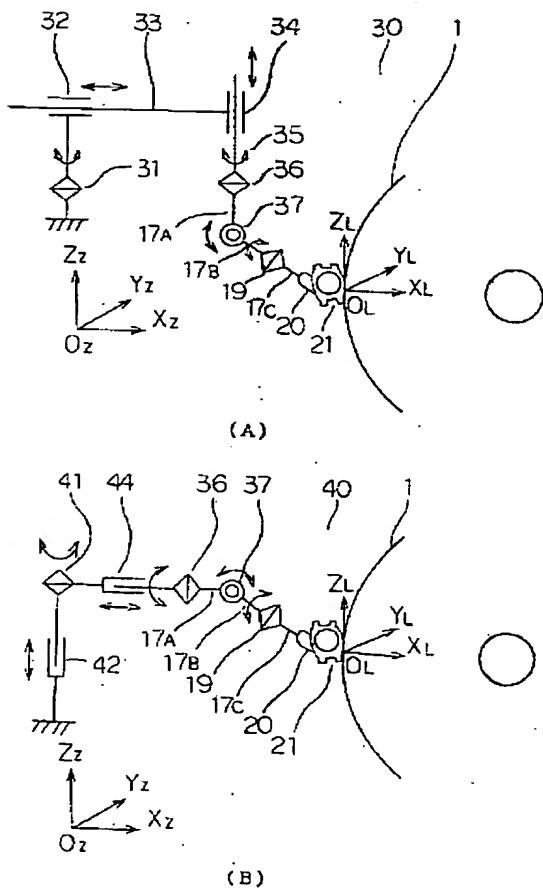


(B)

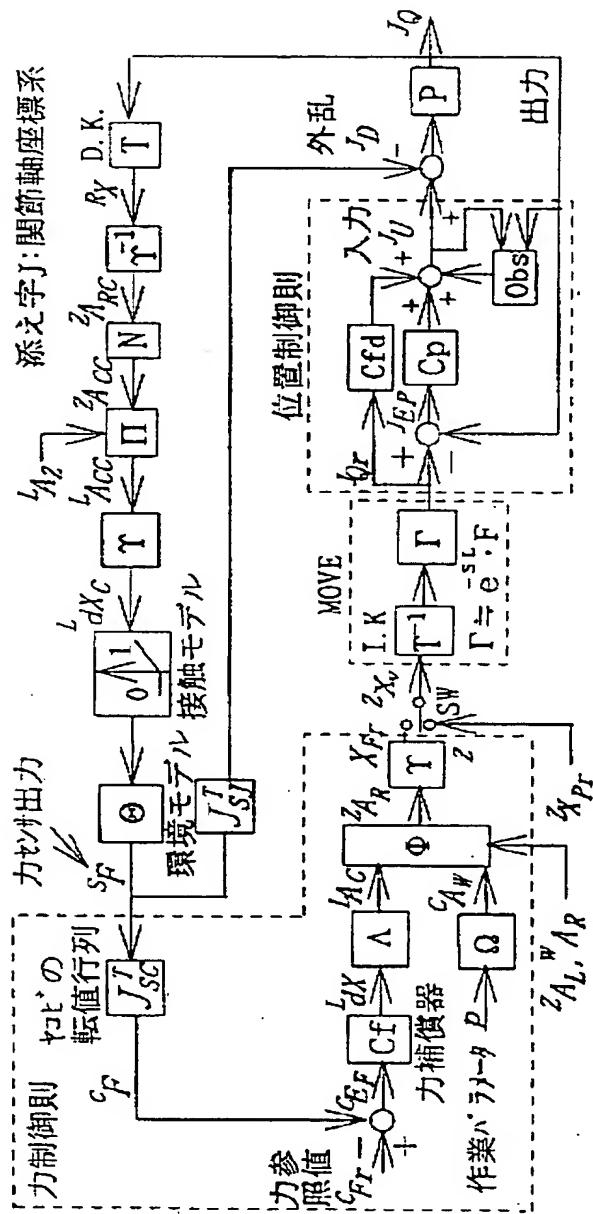
【図9】



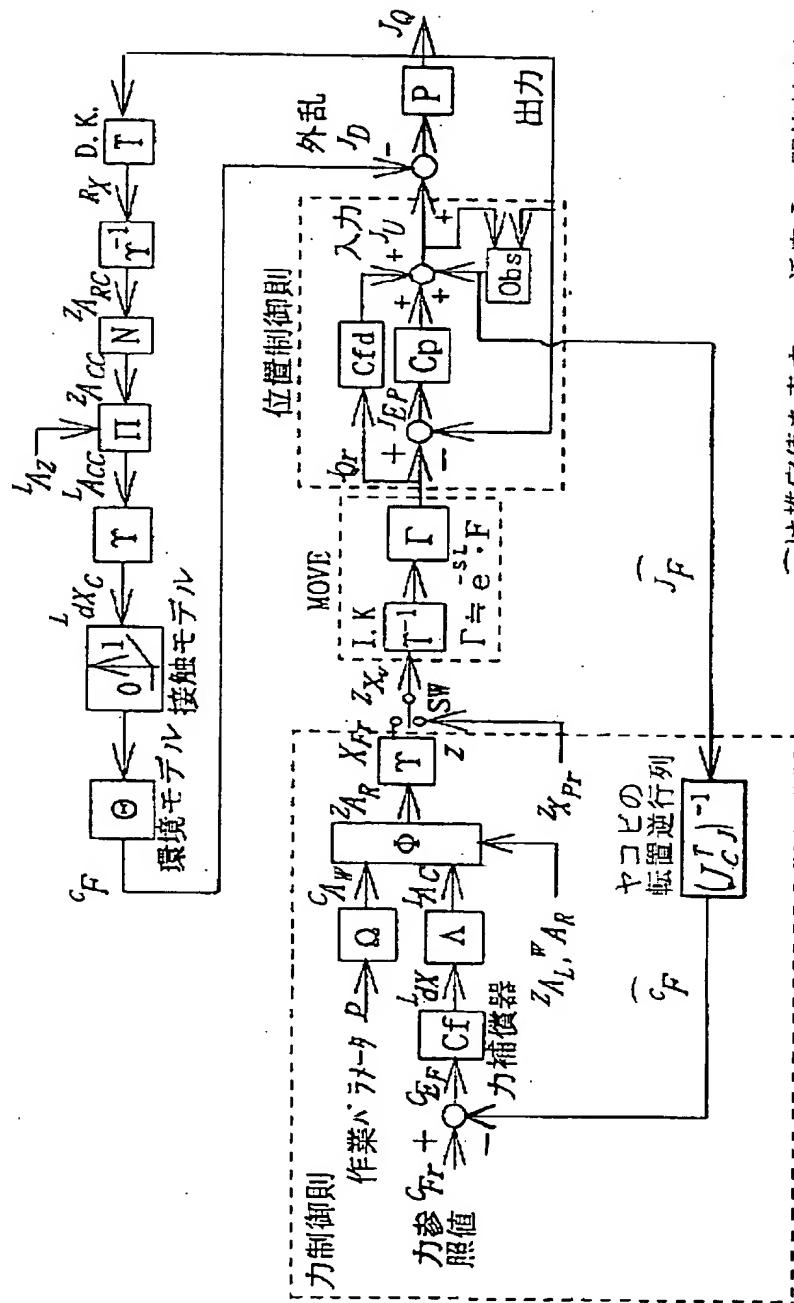
【図13】



【図1.1】



【図12】



→は推定値を表す。添字 J : 關節軸座標系